

## Análise da concentração mássica de materiais particulados provenientes da combustão de diesel e biodiesel

### Analysis of the mass concentration of particulate matter from the combustion of diesel and biodiesel

Simone Gomes<sup>1</sup>

Mayara Ananda Gauer<sup>2</sup>

Waldir Nagel Schirmer<sup>3(\*)</sup>

Samuel Nelson Melegari de Souza<sup>4</sup>

#### Resumo

O biodiesel tem se apresentado como uma excelente fonte de energia alternativa, podendo substituir o diesel mineral. Esse biocombustível é considerado menos impactante, pois é uma alternativa renovável, emite menos poluentes durante sua queima e, além disso, possui um processo de produção mais limpo, trazendo benefícios ambientais. O objetivo deste estudo foi avaliar as concentrações mássicas de material particulado emitido a partir da combustão de diesel (B0) e biodiesel de soja (B100) sob duas diferentes cargas, 500 W e 1500 W, em um motor ciclo diesel de bancada. A concentração de material particulado obtida foi menor com o uso de biodiesel, que apresentou concentrações de 438 mg m<sup>-3</sup> e 458 mg m<sup>-3</sup> enquanto que para o diesel as concentrações foram de 837 mg m<sup>-3</sup> e 848 mg m<sup>-3</sup> para as duas cargas, respectivamente. Os resultados indicaram que a concentração de material particulado é diretamente proporcional à carga aplicada no motor, ou seja, na carga de 1500 W, obteve-se um aumento na concentração de material particulado de 1,3% com o uso de diesel e 4,4% com o uso de biodiesel. Esses resultados indicam que o uso do biodiesel de soja contribui para a redução da poluição atmosférica.

**Palavras-chave:** poluição atmosférica; biocombustíveis; biodiesel de soja.

---

1 Engenheira Ambiental; Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Bioenergia na Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG; Endereço: Avenida General Carlos Cavalcanti, 4748, CEP: 84030-900, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; E-mail: [si.gomes90@gmail.com](mailto:si.gomes90@gmail.com)

2 MSc.; Engenheira Ambiental; Professora do Centro Universitário de União da Vitória, UNIUV; Endereço: Avenida Bento Munhoz da Rocha Neto, 3856, CEP: 84600-000, União da Vitória, Paraná, Brasil; E-mail: [mayaragauer@yahoo.com.br](mailto:mayaragauer@yahoo.com.br)

3 Dr.; Professor do Departamento de Engenharia Ambiental e dos Programas de Pós-Graduação Bioenergia e Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná, UNICENTRO; Endereço: Rodovia PR-153, km 07, Riozinho, CEP: 84500-000, Irati, Paraná, Brasil; E-mail: [wanasch@hotmail.com](mailto:wanasch@hotmail.com) (\*) Autor para correspondência.

4 Dr.; Engenheiro Mecânico; Professor do Centro de Ciências Exatas da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, e dos Programas de Pós-Graduação em Energia da Agricultura, UNIOESTE, Bioenergia, UNIOESTE/UEL; Bolsista Produtividade em Pesquisa do CNPq; Endereço: Rua Universitária, 2069, CEP: 84814-110, Cascavel, Paraná, Brasil; E-mail: [samuel.nelson@pq.cnpq.br](mailto:samuel.nelson@pq.cnpq.br)

## Abstract

The biodiesel has been showed as an excellent source of alternative energy, can replace mineral diesel. This biofuel is considered less harmful, because it is a renewable alternative, emits fewer pollutants during its burning and also has a cleaner production process, bringing environmental benefits. The aim of this study was to evaluate the mass concentrations of particulate material emitted from the combustion of diesel (B0) and soybean biodiesel (B100) under different load conditions (500 W and 1500 W) in a cycle diesel engine bench. The results indicated that the concentration of particulate material is directly proportional to the applied load on the engine, in other words, comparing the loads of 500 W and 1500 W, the latter obtained an increase in the concentration of particulate material of 1,3% using diesel and 4,4% using biodiesel. Moreover, between the two fuels, the concentration of particulate material was lower with the use of biodiesel, which showed concentrations of  $438 \text{ mg m}^{-3}$  and  $458 \text{ mg m}^{-3}$  while for diesel the concentrations were  $837 \text{ mg m}^{-3}$  and  $848 \text{ mg m}^{-3}$ . These results indicate that the use of soybean biodiesel contributed to reduction of atmospheric pollution.

**Key words:** atmospheric pollution; biofuels; soybean biodiesel.

## Introdução

A maior parte da energia consumida no planeta provém dos combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural), que se constituem em fontes de energia não-renováveis, limitadas e com previsão de esgotamento futuro. Neste cenário, o desenvolvimento e a procura por fontes alternativas de energia se tornam, a cada dia, mais relevantes (FARIA et al., 2007; CUNHA, 2008).

O processo de urbanização, o crescimento populacional, o desenvolvimento de novas tecnologias e o aumento significativo na frota de veículos automotores, vêm contribuindo para a elevação das taxas de emissões de poluentes atmosféricos (FERREIRA; SANTOS; SOUZA, 2008). Devido ao crescente aumento no número de veículos que circulam pelas ruas, a contribuição das emissões

por estas fontes móveis é mais significativa se comparado às emissões provenientes das atividades industriais (fontes fixas) (CORRÊA; ARBILLA, 2006). Dessa forma, os níveis de emissão frequentemente excedem os padrões de emissão para alguns poluentes atmosféricos. Tais emissões estão principalmente relacionadas a óxidos de carbono ( $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), compostos orgânicos voláteis (COV) e material particulado para a atmosfera (SCHIRMER, 2004; BARBOSA, 2006; FERREIRA; SANTOS; SOUZA, 2008; MORAES, 2008; SILVA FILHO, 2010).

Conforme afirma Cunha (2008), o aumento da demanda pelo transporte de cargas e passageiros levou a um aumento direto da utilização de diesel como combustível, trazendo consequências desfavoráveis ao meio ambiente e contribuindo para a escassez de petróleo no planeta.

Desta maneira, de acordo com a mesma autora, a busca por fontes alternativas de energia, que substituam os combustíveis fósseis e atendam aos requisitos econômicos, ambientais e sociais, é fator primordial no que se refere à manutenção do desenvolvimento sustentável.

No âmbito nacional, pesquisas abrangendo o desenvolvimento dos biocombustíveis como fonte energética vêm ganhando proporções cada vez maiores nos últimos anos. A substituição do óleo diesel pelos biocombustíveis traz benefícios ao meio ambiente, como a diminuição qualitativa e quantitativa dos níveis de poluição ambiental, já que este se constitui uma fonte estratégica de energia renovável e, além disso, reduz a dependência de importação do óleo diesel no Brasil (FARIA et al., 2007).

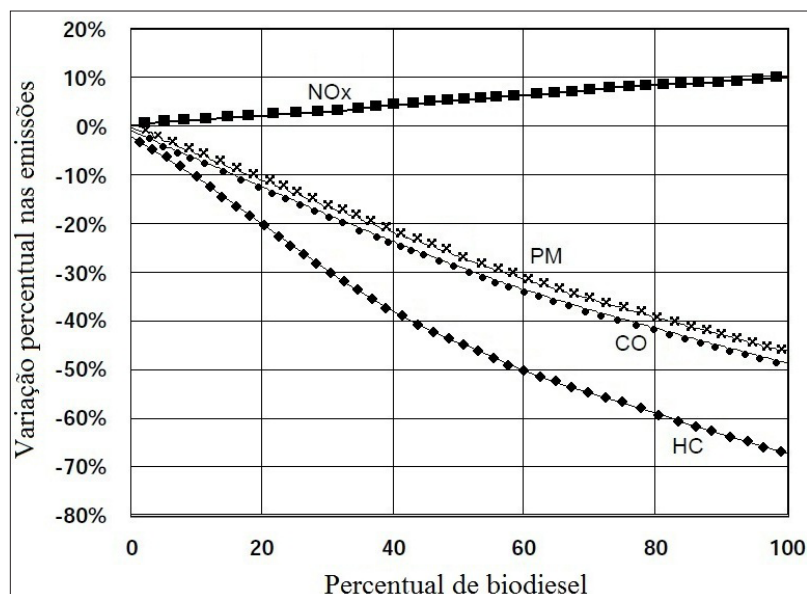
O biodiesel é derivado de matérias-primas como óleos vegetais e gorduras animais, podendo substituir total ou parcialmente o diesel convencional (TYSON, 2004). Quimicamente, define-se biodiesel como sendo o “combustível composto de alquil ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais” (ANP, 2008). No ano de 2004, o governo brasileiro lançou o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), com o objetivo de implementar, de forma técnica e economicamente sustentável, a produção e o uso do biodiesel, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional, via geração de renda e empregos (PORTAL DO BIODIESEL, 2011). Assim, a diversificação das fontes de energia, com o fortalecimento da participação das fontes renováveis, adquire caráter de política pública e estratégia energética, culminando com a promulgação da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, que dispõe sobre a introdução

do biodiesel na matriz energética (BRASIL, 2005; RODRIGUES, 2006). A Resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) nº 06, de 2009 determinou ainda que, a partir de janeiro de 2010, o percentual mínimo obrigatório de adição de biodiesel ao diesel comercializado fosse de 5% em volume, ao consumidor final, em todo território nacional (BRASIL, 2009a).

De um modo geral, os veículos automotores podem emitir poluentes pelo seu escapamento (emissões diretas, ocorridas pela queima do combustível no motor) ou por meio de perdas evaporativas (evaporação de hidrocarbonetos do sistema de alimentação de combustível, ocasionada por mudanças de temperatura e pressão) que ocorrem durante o uso e/ou repouso do veículo. Tais emissões são influenciadas diretamente por fatores como porte, uso e idade do veículo, tecnologia do motor, manutenção e, principalmente, pelo tipo e qualidade do combustível utilizado (BRASIL, 2011).

Os biocombustíveis, além de emitirem menos poluentes que os combustíveis fósseis durante sua queima, possuem seu processo de produção mais limpo, sendo considerados menos impactantes que os combustíveis tradicionais (ANP, 2010). O biodiesel, por exemplo, contém mais oxigênio se comparado ao diesel (11% de oxigênio em peso), o que proporciona uma queima mais completa do combustível, reduzindo consequentemente a emissão de poluentes como hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SOx), monóxido de carbono (CO) e material particulado (TYSON, 2004; NREL, 2009). A figura 1 apresenta a redução na emissão de poluentes à medida que se adiciona biodiesel ao diesel mineral (o que já não ocorre com os óxidos de nitrogênio - NOx).

Figura 1 - Variação das emissões de poluentes em função da adição de biodiesel



Fonte: Adaptado de U. S. EPA (2002).

Os materiais particulados estão entre os principais poluentes do ar. O termo material particulado refere-se ao conjunto de micropartículas sólidas e líquidas suspensas no ar, compreendendo ácidos, compostos orgânicos, metais, partículas de solo ou poeira, pólen e esporos (U. S. EPA, 2003) ou, de maneira simplificada, considera-se “particulado” aquela partícula cujo diâmetro aerodinâmico é menor que 100  $\mu\text{m}$  (ZANELLA, 2008). Segundo a U. S. EPA (2003), a exposição aguda a este tipo de poluente pode desenvolver crises asmáticas, agravar afecções pulmonares e aumentar a susceptibilidade às doenças respiratórias, enquanto que a exposição prolongada pode comprometer as funções pulmonares, causar bronquite crônica e ainda diminuir consideravelmente a expectativa de vida do indivíduo.

Cientistas descobriram, a partir de 1990, que os efeitos na saúde advindos da poluição por material particulado estavam diretamente relacionados ao diâmetro da

partícula. Assim, passaram a caracterizá-las pelo seu tamanho e composição, considerados parâmetros importantes, porque determinam o sítio do trato respiratório que elas irão se depositar (FENGER, 2009). Partículas maiores tendem a se acumular nas vias respiratórias superiores, as quais podem ser facilmente removidas por mecanismos de defesa (expulsão do particulado). Partículas com diâmetro inferior a 10  $\mu\text{m}$  são as ditas *inaláveis*; e partículas com diâmetro inferior a 2,5  $\mu\text{m}$  são capazes de alcançar os brônquios e os alvéolos pulmonares, sendo, portanto, ainda mais prejudiciais à saúde (CASTANHO, 1999). Outro problema relacionado às partículas finas é que elas possuem uma grande área superficial, o que as permite adsorver e carregar consigo uma grande quantidade de substâncias tóxicas e cancerígenas, como sulfatos, benzopireno, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), metais e dioxinas, potencializando seus efeitos danosos sobre a saúde e meio

ambiente (ÁLVARES JUNIOR; LACAVA; FERNANDES, 2002).

No caso da queima de combustíveis em motores, o material particulado forma-se a partir de gotículas individuais em regiões da câmara de combustão sob altas temperaturas, envolvendo uma sequência de etapas elementares (MENEZES, 2009). De acordo com esse mesmo autor, nessas regiões, a reação de oxidação é limitada pela concentração de oxigênio, cujo transporte ocorre por difusão através da chama. Esse material particulado é composto essencialmente por carbono, apresenta uma aparência amorfa e é resultante da combustão incompleta, ou seja, da combustão com quantidade insuficiente de oxigênio (VALENTE, 2007). A “fumaça negra”, proveniente da queima do diesel em motores, atua como uma importante fonte de material particulado fino para a atmosfera (MIRANDA, 2007; FENGER, 2009).

O presente trabalho visa determinar a redução na concentração mássica das emissões de material particulado provenientes da combustão de biodiesel em substituição ao diesel, sob duas diferentes condições de carga em um motor de bancada.

## **Materiais e Métodos**

### **Combustíveis utilizados**

Para realização dos testes em motor de bancada, utilizou-se Diesel Interior tipo A (livre de corantes e aditivos e com teor máximo de enxofre de 1800 ppm), cedido pela Refinaria Petrobrás de Araucária-PR (REPAR). Ressalta-se que o diesel fornecido pela REPAR não possuía qualquer adição de biodiesel. Em

relação ao biodiesel utilizado, ele foi obtido de empresa especializada e devidamente cadastrada na Agência Nacional do Petróleo, Biocombustíveis e Gás Natural (ANP) para a comercialização deste combustível a empresa BSBIO, situada no município de Passo Fundo (RS). Devido soja ser a principal oleaginosa produzida no Brasil e o principal componente na produção do biodiesel, foi utilizado biodiesel produzido a partir de soja nesse trabalho, obtido via rota metílica. As tabelas 1 e 2 apresentam algumas das principais características dos dois combustíveis utilizados, de acordo com os respectivos laudos de análises físico-químicas fornecidos pelas empresas.

Caracterização do motor ciclo diesel utilizado, condições de operação e ensaios de combustão.

Para a realização dos testes de emissão, foi empregado um motor de bancada com injeção direta, marca Branco, modelo BD 6500 CF e potência de 7,36 kW (10 cv), acoplado a um gerador de 5,5 kW, instalado no Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia (CASA), *Campus* de Cascavel, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). O motor gerador apresenta as seguintes características (Tabela 3).

Para os ensaios, o motor foi abastecido com diesel e, posteriormente, biodiesel. O abastecimento foi realizado através de uma adaptação no sistema de alimentação de diesel combustível com a colocação de um recipiente externo, interligado através de um tubo tipo *thermoplastic* no filtro de combustível. Assim, o combustível (diesel ou biodiesel) era reintroduzido quando se verificava que o recipiente estava quase vazio.

Tabela 1- Principais características do combustível diesel utilizado

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Aspecto	Visual	LII <sup>(1)</sup>	LII	N/A
Cor	Visual	INAM <sup>(2)</sup>	INAM	N/A
Enxofre total	ASTM D 4294	1800 (máx)	1551	mg.kg <sup>-1</sup>
Massa específica a 20°C	ASTM D 4052	820,0 a 880,0	847,5	(kg.m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>
Viscosidade cinemática a 40°C	ASTM D 445	2,0 a 5,0	3,161	mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
Ponto de entupimento	ASTM D 6371	7,0 (máx)	4	°C
Índice de cetano calculado	ASTM D 4737	45,0 (mín)	45,6	N/A
Ponto de fulgor	ASTM D 93	38,0 (mín)	42,5	°C
Água e sedimentos	ASTM D 2709	0,05 (máx)	0,000	% volume
Cinzas	ASTM D 482	0,010 (máx)	0,0011	% massa

Fonte: Autores (2011).

Nota: (1) LII: Límpido e isento de impurezas

(2) INAM: Usualmente de incolor a amarelada, podendo apresentar-se ligeiramente alterada para as tonalidades marrom e alaranjada.

Tabela 2 - Principais características do biodiesel de soja utilizado

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Aspecto a 25 °C	Visual	LII <sup>(1)</sup>	LII	N/A
CFPP <sup>(2)</sup>	ASTM D 6371	19 (máx)	-2	°C
Enxofre total	ASTM D 5453	50 (máx)	0,45	mg.kg <sup>-1</sup>
Massa específica a 20 °C	ASTM D 4052	850,0 – 900,0	881,20	(kg.m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>
Viscos. cinemática a 40 °C	ASTM D 445	3,0 – 6,0	4,102	mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
Ponto de fulgor	ASTM D 93	100 (mín)	122	°C
Teor de água	ASTM D 6304	500 (máx)	225	mg.kg <sup>-1</sup>
Cinzas sulfatadas	ASTM D 874	0,020 (máx)	0,0000	% massa
Glicerina livre	ASTM D 6584	0,020 (máx)	0,007	% massa
Glicerina total	ASTM D 6584	0,25 (máx)	0,209	% massa
Monoglicerídeos	ASTM D 6584	Anotar	0,635	% massa
Diglicerídeos	ASTM D 6584	Anotar	0,198	% massa
Triglicerídeos	ASTM D 6584	Anotar	0,075	% massa
Metanol	EN 14110	0,20 (máx)	0,1	% massa
Estabilidade à oxidação a 110 °C	EN 14112	6 (mín)	11,22	Horas

Fonte: Autores (2011).

Nota: (1) LII: Límpido e isento de impurezas.

(2) Ponto de entupimento de filtro a frio.



Tabela 3 - Principais características do motor gerador usado nos ensaios de combustão

Característica	Especificação	Unidade
Combustível	Diesel / Biodiesel	-
Potência máxima	5,8	KVa
Potência nominal	5,2	KVa
Partida	Manual	-
Capacidade do tanque	12,5	L
Peso	95	Kg
Dimensões (C x L x A)	735 x 485 x 670	mm
Autonomia (50% de carga)	5,20	horas

Fonte: Branco (2010).

O motor permaneceu em funcionamento até atingir o volume de ar amostrado necessário, para cada uma das situações avaliadas.

Foram realizados quatro tratamentos abastecendo-se o motor com diesel e, posteriormente, com biodiesel, aplicando as cargas de 500 W e 1500 W ao motor, para ambos os combustíveis e com todas as coletas feitas em duplicata. A variação de carga no motor foi obtida por meio de um banco de resistências elétricas acopladas ao motor gerador. Essa variação de carga nos testes de combustão é importante, uma vez que a literatura mostra que as emissões de material particulado nos processos de combustão são diretamente proporcionais à carga aplicada no motor avaliado (NING; CHEUNG; LIU, 2004; DWIVEDI; AGARWAL; SHARMA, 2006; MIRANDA, 2007).

#### **Determinação da concentração mássica de material particulado em cada ensaio**

A metodologia, aqui proposta utiliza-se de princípio similar àqueles apresentados nas Normas de Higiene Ocupacional 03 e 08 (NHO 03 e NHO 08), do Ministério

do Trabalho (BRASIL, 2001; BRASIL, 2009b). Assim, a determinação da massa de material particulado foi realizada por análise gravimétrica, em função do volume de gás amostrado (concentração mássica). O volume de ar amostrado em cada ensaio foi de 6 litros (vazão ajustada de 300 mL min<sup>-1</sup>). Assim, conhecendo-se a massa e o volume de ar amostrado, determinou-se a concentração do particulado coletado em cada ensaio de combustão (ensaio 1 a 4, conforme Tabela 4) (CASTANHO, 1999; QUEIROZ; JACOMINO; MENEZES, 2007).

Antes de cada ensaio, os filtros (membranas) utilizados (de éster-celulose, com 37 mm × 0,8 µm) foram previamente pesados numa balança analítica eletrônica (de 10<sup>-5</sup> g de precisão, marca Shimadzu, modelo AUW-220) e permaneceram em dessecador por um período de 24 horas, de modo a evitar interferência da umidade na massa das amostras

O aparato de amostragem é mostrado na figura 2 constituindo-se de porta-filtro de teflon e bomba amostradora (da marca Air Chek, modelo XR5000, com faixa de vazão de 5 a 5000 mL min<sup>-1</sup> e controle digital de fluxo), própria a este tipo de amostragem.

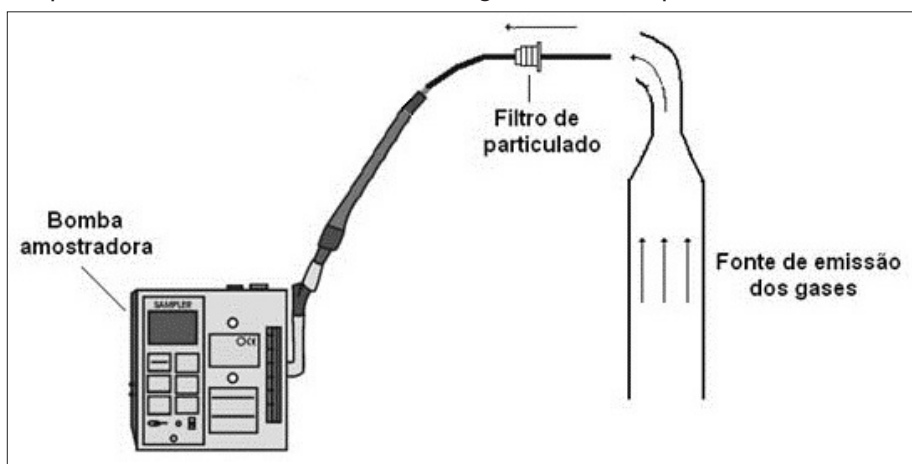
## Resultados e discussão

Nas análises desse estudo, verificou-se a concentração mássica do material particulado proveniente da emissão gasosa de diesel e de biodiesel sob duas diferentes condições de carga do motor. A tabela 4 apresenta os valores de concentração mássica para cada ensaio realizado.

A concentração mássica de material particulado é diretamente proporcional à carga do motor, ou seja, quanto maior sua carga, maior a emissão de partículas (NING; CHEUNG; LIU, 2004;

DWIVEDI; AGARWAL; SHARMA, 2006; MIRANDA, 2007). Vê-se, pela Tabela 4, que a mesma tendência é obtida no presente estudo para ambos os combustíveis. A maior concentração de partículas obtida com a carga de 1500 W se deve à maior quantidade de combustível que é injetado e queimado no motor, o que acarreta na maior formação e emissão de partículas. Estudos realizados por Dwivedi, Agarwal e Sharma (2006), usando diesel e B20 (80% de diesel mineral e 20% de biodiesel), encontraram um aumento na concentração de material particulado com o aumento da carga. Para

Figura 2 - Aparato utilizado nos ensaios de amostragem do material particulado



Fonte: Autores (2011)

o diesel e B20 na carga de 0%, os autores observaram uma concentração de  $22 \text{ mg m}^{-3}$  e  $17 \text{ mg m}^{-3}$ , enquanto que na carga de 100% a concentração foi de  $59 \text{ mg m}^{-3}$  e  $48 \text{ mg m}^{-3}$ , respectivamente. Esse aumento na emissão de partículas com o aumento da carga também foi reportado por Ning, Cheung e Liu (2004), onde na carga de 0% a emissão foi aproximadamente  $125 \text{ mg m}^{-3}$  enquanto que para a carga de 100% foi próximo a  $260 \text{ mg m}^{-3}$ , utilizando diesel como combustível.

A emissão de material particulado foi maior em B0 do que em B100, da mesma forma, como reportado por vários autores (WANG et al., 2000; MENEZES; CATALUÑA, 2002; CARDONE et al., 2003; DWIVEDI; AGARWAL; SHARMA, 2006; HU et al., 2008; LAPUERTA; ARMAS; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, 2008; LAPUERTA; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ; AGUDELO, 2008; CHUEPENG et al., 2011). A menor concentração de partículas emitidas pelo



Tabela 4 - Concentrações mássicas de particulados emitidos nos ensaios realizados

Ensaio	Combustível	Carga aplicada ao motor (W)	Concentração (mg m <sup>-3</sup> )*
1	Diesel	500	837
2	Diesel	1500	848
3	Biodiesel	500	438
4	Biodiesel	1500	458

Fonte: Autores (2011).

Nota: (\*) Cada valor refere-se à média de duas amostragens (duplicatas) feitas em cada tratamento.

biodiesel em comparação ao diesel mineral deve-se principalmente ao maior teor de oxigênio presente na molécula de biodiesel (VON WEDEL, 1999; WANG et al., 2000; LAPUERTA; ARMAS; BALLESTEROS, 2002; TYSON, 2004; LAPUERTA; RODRÍGUEZ - FERNÁNDEZ; AGUDELO, 2008). Esse maior teor de oxigênio aumenta a eficiência da combustão, ou seja, faz com que a combustão seja mais completa (VON WEDEL, 1999; ALTIPARMAK et al., 2007; NREL, 2009) obtendo-se assim, uma redução na emissão de material particulado (VON WEDEL, 1999).

Outro fator que está diretamente relacionado à eficiência da combustão é o índice de cetano, que mede a qualidade de ignição do combustível, ou seja, refere-se à capacidade de um combustível entrar em combustão de forma adequada no motor. Quanto maior esse índice, melhor será a sua combustão. O biodiesel apresenta um índice médio de cetano de 60 enquanto que o índice médio do diesel mineral situa-se entre 48 a 52 (PARENTE, 2003; TYSON, 2004). O biodiesel apresenta um maior número de cetano em função da cadeia carbônica (longa, linear e não ramificada) dos ácidos graxos que o compõe. Essa cadeia carbônica é semelhante à do diesel, entretanto, o biodiesel contém de 16 a 18 átomos de carbono enquanto o óleo diesel

apresenta aproximadamente 14 átomos de carbono (MENEZES, 2009).

Além disso, outra característica presente no biodiesel que propicia a redução na emissão de particulados do motor é o teor de enxofre, do qual o biodiesel está praticamente isento (WANG et al., 2000; MARICQ, 2007; MIRAGAYA; MILLEN, 2007; MENEZES, 2009; RANDAZZO, 2009), pois os óleos vegetais não apresentam enxofre (PARENTE, 2003; RANDAZZO, 2009). O enxofre seria um elemento químico indesejável para o meio ambiente e também para os motores, devido à formação de ácido sulfúrico que corrói partes metálicas do motor (ÁLVARES JUNIOR; LACAVA; FERNANDES, 2002), além de aumentar a emissão de fumaça nas fases de aquecimento (RANDAZZO, 2009). A concentração de enxofre está diretamente ligada à emissão de particulados (ÁLVARES JUNIOR; LACAVA; FERNANDES, 2002; MIRAGAYA; MILLEN, 2007). De acordo com a tabela 2, o teor de enxofre presente no biodiesel utilizado é de 0,45 ppm, enquanto que para o diesel é de 1551 ppm. Assim, o menor teor de enxofre do biodiesel contribuiu para a redução na emissão de particulados. Ullman, Spreen e Mason (1994) concluíram que o teor de aromáticos não afeta significativamente a emissão de material particulado, enquanto

que diminuições de até 100 ppm no teor de enxofre entre os combustíveis analisados, alcançou uma redução na concentração de particulados de 3 a 5%. Lapuerta, Armas e Herreros (2008) também apontam que a redução de partículas pode ser atribuída à redução do teor de enxofre no biodiesel.

O biodiesel pode ser então, um promissor substituto ao diesel mineral e seu uso vem crescendo devido principalmente a questões econômicas (redução da dependência de importação do óleo diesel, por exemplo) e ambientais (reduções nas concentrações de grande parte dos gases emitidos na combustão, aliado ao fato de ser um combustível renovável).

## Conclusão

Nesse estudo, verificou-se que a emissão de material particulado proveniente da combustão de diesel e biodiesel em motores do ciclo diesel aumenta à medida que se eleva a carga aplicada ao motor. Esse aumento ocorreu devido à maior quantidade de combustível necessária em cargas maiores.

Comparando-se a emissão dos dois combustíveis, uma redução na emissão de

particulados foi observada na combustão de biodiesel de soja em relação à queima do diesel mineral. Muitos fatores podem influenciar nesta redução, como o maior teor de oxigênio presente na composição do biodiesel e seu alto índice de cetano, os quais estão relacionados à eficiência da combustão, e seu baixo teor de enxofre e aromáticos, que contribuem para a formação das partículas.

Os resultados indicaram que a concentração de material particulado é diretamente proporcional à carga aplicada no motor, ou seja, na carga de 1500 W, obteve-se um aumento na concentração de material particulado de 1,3% com o uso de diesel e 4,4% com o uso de biodiesel. Os resultados indicam ainda que o uso do biodiesel de soja contribui para a redução da poluição atmosférica.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro

## Referências

ALTIPARMAK, D.; KESKIN, A.; KOCA, A.; GÜRÜ, M. Alternative fuel properties of tall oil fatty acid methyl ester–diesel fuel blends. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 241–246, 2007.

ÁLVARES JUNIOR, O.; LACAVA, C. I. V.; FERNANDES, P. S. **Emissões atmosféricas**. Brasília: SENAI/DNI, 2002. 373p.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Biocombustíveis e Gás Natural. Resolução nº 07, de 19 de março de 2008. Dispõe sobre a especificação do biodiesel a ser comercializado pelos diversos agentes econômicos autorizados em todo o território nacional. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 20 mar. 2008.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Biocombustíveis**. 2010. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/?pg=33972&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1298377581721>>. Acesso em: 10 out. 2011.

BARBOSA, R. L. **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel**. 2006. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2006.

BRANCO. **Geradores Diesel BD 6500 CF**. 2010. Disponível em: <<http://www.branco.com.br/produtos/geradores/bd-6500-cfb-d-6500-cfe>>. Acesso em: 20 set. 2011.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. FUNDACENTRO. NHO-03: **Análise gravimétrica de aerodispersóides sólidos coletados sobre filtros de membrana**; método de ensaio. São Paulo: Fundacentro, 2001. 26 p. Disponível em: <<http://www.fundacentro.gov.br/ARQUIVOS/PUBLICACAO/1/NHO03.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2011.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 14 jan. 2005, 2005.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Conselho Nacional de Política Energética. Resolução nº 06, de 16 de setembro de 2009 (2009a). Estabelece em cinco por cento, em volume, o percentual mínimo obrigatório de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final, de acordo com o disposto no art. 2º da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 26 out. 2009.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. FUNDACENTRO. NHO-08: **Coleta de material particulado sólido suspenso no ar de ambientes de trabalho**. Procedimento técnico. São Paulo, 2009b. 24p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários – **Relatório Final**, 2011. 114 p.

CARDONE, M.; MAZZONCINI, M.; MENINI, S.; ROCCO, V.; SENATORE, A.; SEGGIANI, M.; VITOLO, S. Brassica carinata as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: agronomic evaluation, fuel production by transesterification and characterization. **Biomass and Bioenergy**, v. 25, p. 623–636, 2003.

CASTANHO, A. D. A. **A determinação quantitativa de fontes de material particulado na atmosfera da cidade de São Paulo**. 1999. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CHUEPENG, S.; XU, H.; TSOLAKIS, A.; WYSZYNSKI, M.; PRICE, P. Particulate matter size distribution in the exhaust gas of a modern diesel engine fuelled with a biodiesel blend. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, p. 1-10, 2011.

CORRÊA, S. M.; ARBILLA, G. Aromatic hydrocarbons emissions in diesel and biodiesel exhaust. **Atmospheric Environment**, v. 40, p. 6821–6826, 2006.

CUNHA, M. E. **Caracterização de biodiesel produzido com misturas binárias de sebo bovino, óleo de frango e óleo de soja**. 2008. 86 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DWIVEDI, D.; AGARWAL, A. K.; SHARMA, M. Particulate emission characterization of a biodiesel vs diesel-fuelled compression ignition transport engine: a comparative study. **Atmospheric Environment**, v. 40, p. 5586–5595, 2006.

FARIA, R. C. M.; REZENDE, M. J. C.; REZENDE, C. M.; PINTO, A. C. Desenvolvimento e validação de metodologia de análise de misturas biodiesel: diesel utilizando cromatografia gasosa-espectrometria de massas. **Química Nova**, v.30, n.8, p.1900-1905, 2007.

FENGER, J. Air pollution in the last 50 years – from local to global. **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 13–22, 2009.

FERREIRA, S. L.; SANTOS, A. M.; SOUZA, G. R. Análise por cromatografia gasosa de BTEX nas emissões de motor de combustão interna alimentado com diesel e mistura diesel-biodiesel (B10). **Química Nova**, v.31, n.3, p.539-545, 2008.

HU, Z.; TAN, P.; YAN, X.; LOU, D. Life cycle energy, environment and economic assessment of soybean-based biodiesel as an alternative automotive fuel in China. **Energy**, v. 33, p. 1654–1658, 2008.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; BALLESTEROS, R. **Diesel particulate emissions from biofuels derived from Spanish vegetable oils**. University of Castilla-La Mancha, 2002. Disponível em: <[http://www.acbiodiesel.net/docs/ponencies/2004/ResumMagin\(Ang\).pdf](http://www.acbiodiesel.net/docs/ponencies/2004/ResumMagin(Ang).pdf)>. Acesso em: 10 out. 2011.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; HERREROS, J. M. Emissions from a diesel-bioethanol blend in an automotive diesel engine. **Fuel**, v. 87, p. 25–31, 2008.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, J. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, p. 198–223, 2008.

LAPUERTA, M.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, J.; AGUDELO, J. R. Diesel particulate emissions from used cooking oil biodiesel. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 731–740, 2008.

MARICQ, M. M. Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review. **Aerosol Science**, v. 38, p. 1079–1118, 2007.

MENEZES, E. W. **Produção de trabalhos, geração de contaminantes e tratamento pós-combustão em motores ciclo diesel**. 2009. 150 f. Dissertação (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MENEZES, E. W.; CATALUÑA, R. Desempenho e emissões em formulações diesel/biodiesel. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 25., **Resumos [Online]**, Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Química, 2002. Disponível em: <<http://sec.sbq.org.br/cdrom/31ra/resumos/T1530-2.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2011.

MIRAGAYA, J. C. G.; MILLEN, R. P. **Biodiesel na Petrobras**, 2007. Disponível em: <<http://www.planetasoja.com/trabajos/trabajos800.php?id1=20324&id2=20326&publi=&idSec=163>>. Acesso em: 6 out. 2011.

MIRANDA, G. R. **Avaliação das emissões atmosféricas provenientes da combustão do diesel, biodiesel de óleo de fritura e suas misturas**. 2007. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MORAES, M. S. A. **Biodiesel de sebo: avaliação de propriedades e testes de consumo em motor a diesel**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

NING, Z.; CHEUNG, C. S.; LIU, S. X. Experimental investigation of the effect of exhaust gas cooling on diesel particulate. **Aerosol Science**, v. 35, p. 333-345, 2004.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. **Biodiesel: Handling and Use Guide**. TP-540-43672, 4. ed. 2009.

PARENTE, E. J. S. **BIODIESEL: Uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza, CE, 2003. Disponível em: <<http://www.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2008/01430.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2011.

PORTAL DO BIODIESEL. **Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel**. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/>>. Acesso em: 3 jul. 2011.

QUEIROZ, P. G. M.; JACOMINO, V. M. F.; MENEZES, M. A. B. C. Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de Sete Lagoas, Minas Gerais. **Química Nova**, v. 30, n. 5, p. 1233-1239, 2007.

RANDAZZO, M. L. **Emissões e performance de um veículo operando com misturas de óleo diesel, biodiesel e etanol**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

RODRIGUES, R. A. **Biodiesel no Brasil: Diversificação Energética e Inclusão Social com Sustentabilidade**. In: FERREIRA, J. R.; CRISTO, C. M. P. N. (Coord.). O futuro da indústria Biodiesel: Coletânea de artigos. Brasília: MDIC-STI/IEL, 2006. p.145.

SCHIRMER, W. N. **Amostragem, análise e proposta de tratamento de compostos orgânicos voláteis (COV) e odorantes em estação de despejos industriais de refinaria de petróleo**. 2004. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SILVA FILHO, D. A. (Coord.). **Química Verde no Brasil: 2010-2030**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. 438p.

TYSON, K. S. **Biodiesel handling and use guidelines, report of national renewable energy laboratory**. NREL/TP-580-3004 US, 2004.

ULLMAN, T. L.; SPREEN, K. B.; MASON, R. L. **Effects of cetane number, cetane improver, aromatics, and oxygenates on 1994 heavy-duty diesel engine emissions**. SAE paper 941020, 1994.

U. S. EPA. **A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions, draft technical report**. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C. EPA 420/P-02/001, October, 2002.

U. S. EPA. **Air quality criteria for particulate matter**. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. EPA 600/P-95/001, 2003.

VALENTE, O. S. **Desempenho e emissões de um motor gerador de energia elétrica operando com biodiesel**. 2007. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

VON WEDEL, R. **Handbook of biodiesel: emissions reductions with biodiesel**, 1999. Disponível em: <<http://www.cytoculture.com/Biodiesel%20Handbook.htm>>. Acesso em: 27 set. 2011.

WANG, W. G.; LYONS, D. W.; CLARK, N. N.; GAUTAM, M. Emissions from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modification. **Environmental Science Technology**, v. 34, p. 933-939, 2000.

ZANELLA, N. P. **Emissão atmosférica como uma ferramenta na avaliação do desenvolvimento sustentável na indústria do petróleo**. 2008. 122 f. Monografia (Programa de Recursos Humanos N°27 FURG-ANP/MCT “Estudos Ambientais nas Áreas de Atuação da Indústria do Petróleo - Oceanógrafo) – Instituto de Oceanologia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2008.